
УДК 338.24:621.3

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВО- И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕГАТИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

© 2022 г. С. М. Сендеров¹, *, В. И. Рабчук¹, Н. И. Пяткова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*e-mail: ssm@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 26.10.2021 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

В статье представлены основные компоненты методического подхода к разработке инструментария для анализа надежности топливо- и энергоснабжения потребителей в условиях негативных воздействий на работу объектов энергетики. Характеризуются основные факторы, влияющие на надежное функционирование систем энергетики и топливо-энергетического комплекса в целом. Представлены алгоритмы для проведения анализа негативных воздействий на надежность топливо- и энергоснабжения потребителей, для формирования перечней критически важных объектов систем энергетики, а также для выбора мероприятий по снижению последствий негативных возмущений на работу систем энергетики.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, стратегические угрозы, негативные воздействия, надежность топливо- и энергоснабжения

DOI: 10.31857/S0002331022030062

ВВЕДЕНИЕ

Доктриной энергетической безопасности Российской Федерации, утвержденной Президентом РФ в 2019 г. [1], декларируется требование о формировании направлений и мер обеспечения энергетической безопасности России и ее регионов. В рамках этого требования с учетом основных положений такой же Доктрины 2012 г. [2] Департамент оперативного управления ТЭК Минэнерго России в 2020 г. инициировал работу по созданию методического подхода к разработке инструментария для анализа надежности топливо- и энергоснабжения потребителей в условиях негативных воздействий на функционирование энергетических объектов. Такая работа была проведена коллективом исследователей из Федерального государственного учреждения науки Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН). Значительная часть работы посвящена анализу и систематизации факторов, негативно влияющих на функционирование не только отдельных энергетических объектов, но и отраслевых систем энергетики (СЭ) в рамках топливо-энергетического комплекса (ТЭК) страны. Отдельные совокупности негативных факторов формируют новые, либо влияют на уже сформировавшиеся ранее угрозы надежному функционированию отраслевых СЭ. Результатом влияния таких угроз могут стать значительные дефициты конечных видов энергии у потребителей в отдельных регионах.

Для анализа возможностей надежного топливо- и энергоснабжения потребителей при реализации отдельных факторов и их совокупностей (в виде разного рода угроз) разработан специализированный модельный аппарат. Этот аппарат в рамках разрабатываемого инструментария позволит определить в какой мере (в тех или иных условиях работы отдельных энергетических объектов) будут удовлетворены потребности страны и регионов в конечных видах энергии.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЭК

Задачи обеспечения ЭБ и надежности функционирования СЭ в рамках единого ТЭК среди прочего [3] включают:

- обеспечение в нормальных ситуациях бездефицитного, бесперебойного снабжения потребителей экономически доступными энергоресурсами приемлемого качества, а в экстремальных ситуациях – гарантированного удовлетворения минимально необходимого спроса социально значимых и других жизненно важных потребителей;
- поддержание на экономически обоснованном уровне экспорта энергоресурсов.

В России в настоящее время реализация угроз энергетической безопасности как никогда актуальна. Обширные запасы природных энергоресурсов и мощный производственный потенциал ТЭК России позволяют в обозримой перспективе не опасаться ослабления или потери энергетической независимости РФ. Но диспропорции размещения производительных сил и энергетического потенциала вместе с рядом негативных факторов создают серьезные проблемы в энергообеспечении многих регионов. В настоящее время можно выделить следующие укрупненные негативные факторы с позиций обеспечения ЭБ:

- недостаточность инвестиционной активности (дефицит инвестиций) и обусловленное этим некомпенсируемое выбытие производственных мощностей иногда с вынужденным сохранением в работе физически и морально изношенного оборудования;
- значительная изношенность основных производственных фондов энергетики;
- сравнительно низкий технический уровень производственного аппарата ТЭК и сферы энергопотребления;
- расточительное потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), высокая энергоемкость товаров и услуг;
- нарушения устойчивого топливо- и энергоснабжения потребителей в ряде регионов, вызванные высокой аварийностью оборудования и недопоставками первичных ТЭР.

Для анализа влияния негативных факторов в энергетике, способных нарушить надежность топливо- и энергоснабжения потребителей, важно выделить состав объектов, на которые способны влиять эти факторы. Такой состав объектов, структурированный по условным группам, представлен в табл. 1.

Обычно одни и те же факторы в совокупности влияют на различные объекты. Совокупности отдельных факторов формируют соответствующие угрозы ЭБ. Все угрозы ЭБ можно разделить на пять основных групп: экономические, социально-политические, внешнеэкономические и внешнеполитические, техногенные, природные [4]. Среди наиболее тяжелых последствий для обеспечения надежной работы ТЭК при реализации отдельных угроз ЭБ можно выделить следующие:

- нарушение технологической связанности пространственно распределенных систем энергетики с образованием запертых мощностей;
- неприемлемое снижение уровня обеспечения физической безопасности энергетических объектов;

Таблица 1. Основные объекты влияния негативных факторов в энергетике

| Группа | Объекты влияния негативных факторов |
|---------------------------|---|
| Оборудование и технологии | Концентрация энергетических мощностей и производства ТЭР; технический уровень; аварийность; продолжительность сооружения; восстанавливаемость |
| Энергетический баланс | Самообеспеченность энергоресурсами и диверсифицированность энергоснабжения по регионам; возможности для взаимозаменяемости ТЭР; дефициты ТЭР |
| Резервы и запасы ТЭР | Обеспеченность добычи топлива запасами; резервы производства и транспорта ТЭР; запасы топлива в хранилищах и их емкость; заделы в строительстве объектов ТЭК |
| Экономика и финансы | Энергоэффективность экономики; инвестиции в энергетику; финансовое состояние предприятий ТЭК; адаптивность экономики территорий и групп потребителей к перерывам в поставках ТЭР; поставка оборудования для энергетики; степень импортной зависимости |

– дезорганизация процессов управления функционированием отдельных СЭ и их объектов при реализации целевых хакерских атак на соответствующие системы управления.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ

В качестве методической основы анализа последствий для надежности топливо- и энергоснабжения потребителей ТЭР от влияния факторов, воздействующих на условия работы и производственные возможности энергетических объектов, систем энергетики и ТЭК в целом формируется порядок связанных шагов. По сути, такой порядок представляет собой алгоритм оценки масштабов влияния факторов, воздействующих на надежность топливо- и энергоснабжения потребителей.

В процессе анализа по каждому из анализируемых аспектов функционирования СЭ и ТЭК в целом формируется набор возможных угрожающих факторов с вероятными интенсивностями их проявления. Проводится оценка зависимости работоспособности конкретного энергетического объекта, СЭ или ТЭК в целом от условий реализации конкретного негативного фактора. При снижении работоспособности СЭ в условиях реализации негативных факторов (учитывая возможности их сочетания и одновременного негативного воздействия на СЭ и отдельные энергетические объекты) последствия для потребителей ТЭР выражаются в расчетных недопоставках требуемых видов энергии. Анализ таких возможных последствий проводится с использованием специализированных математических моделей, адекватно отражающих основные технологические аспекты функционирования как отдельных СЭ, так и их взаимосвязанной работы в рамках единого ТЭК. Интересующим нас откликом системы топливо- и энергоснабжения потребителей на реализацию различного рода возмущающих факторов станет использование внутренних ресурсов системы (резервы материальные и технологические, возможности по взаимозаменяемости ТЭР, возможности по диверсификации энергоисточников и т.д.). При этом определяются оптимальные уровни использования и сочетания таких возможностей.

Алгоритм оценки влияния факторов, влияющих на надежность топливо- и энергоснабжения потребителей представлен на рис. 1.

Первые три шага алгоритма относятся к единому блоку моделирования состояния ТЭК. В этом блоке описываются экономико-технологические характеристики работы всех учитываемых объектов отраслевых СЭ. По сути, блок представляет собой математическую модель состояния ТЭК с показателями расчетной загрузки всех его техноло-



Рис. 1. Алгоритм оценки влияния факторов, воздействующих на надежность топливо- и энергоснабжения потребителей.

гических элементов и характеристикой затрат на их функционирование. Шаги 4 и 5 представляют собой блок формирования сценариев воздействий. Последние три шага (6, 7 и 8) входят в расчетно-аналитический блок и в совокупности позволяют оценивать влияние различных негативных факторов и их сочетаний на надежность топливо- и энергоснабжения потребителей в анализируемых условиях функционирования отраслевых СЭ и ТЭК в целом. С одной стороны, такое влияние может выражаться в снижении отдельных единичных показателей надежности энергетических объектов и СЭ, а с другой (что значительно ближе потребителю) в недопоставках соответствующих видов конечной энергии конкретным потребителям или их объединениям по отраслевому или региональному признаку.

Порядок проведения исследований по оценке состояния ТЭК с учетом возможных возмущений можно разделить на пять основных этапов:

- формирование сценариев возможных (вероятных) возмущений в СЭ и ТЭК;
- оценка сбалансированности по отдельным ТЭР в регионах и в стране в целом в условиях рассматриваемых сценариев реализации возмущающих воздействий;
- учет возможностей резервирования, диверсификации источников и взаимозаменяемости отдельных ТЭР;
- оценка результатов расчетов с учетом осуществления выбранных мер по обеспечению повышения надежности топливо- и энергоснабжения потребителей.

При моделировании учитываются сезонные неравномерности потребления ТЭР. Кроме этого, модели должны включать в целевую функцию не только затраты на функционирование ТЭК, но и экспертно назначаемые величины штрафов за недоотпуск ТЭР потребителям. Модельные исследования позволят оценить масштабы возможного дефицита ТЭР у потребителей и сформировать рациональные пути минимизации негативных последствий при реализации угроз.

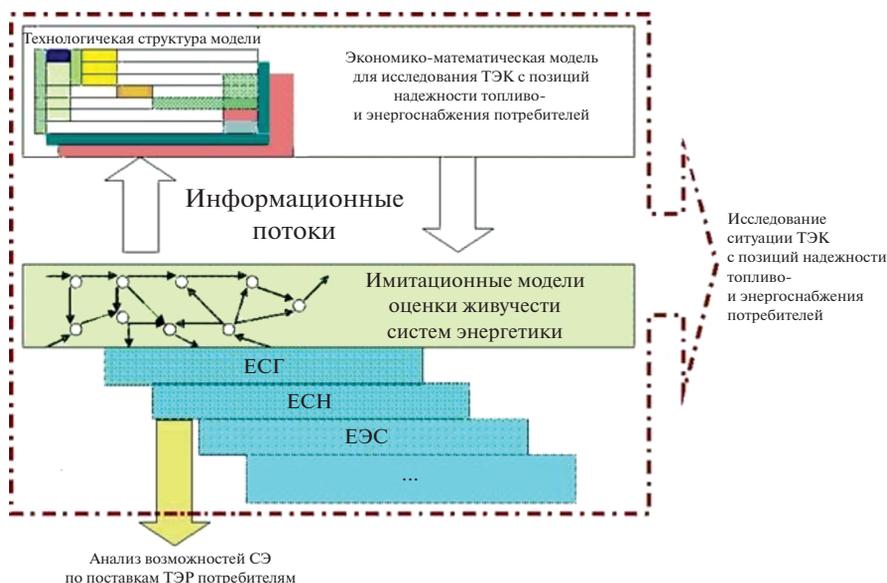


Рис. 2. Взаимосвязь моделей двухуровневой технологии.

На рис. 2 приведена схема информационных взаимосвязей между моделями первого и второго уровней (уровни ТЭК и СЭ) с характеристикой основных задач, решаемых на каждом из уровней. Для согласования моделей разных уровней иерархии используются методы итеративного агрегирования и многоступенчатой оптимизации. В данном подходе модели верхнего уровня строятся путем агрегирования моделей нижнего уровня. Агрегированные решения, полученные с помощью моделей верхнего уровня, передаются в модели нижнего уровня и используются ими как границы, в пределах которых формируются детализированные решения.

Порядок проведения исследований (с учетом возможностей реализации возмущающих воздействий) с применением двухуровневой технологии следующий:

- формирование расчетных условий для моделей двух уровней;
- выявление “узких” (с позиций надежности топливо- и энергоснабжения потребителей) мест в отраслевых СЭ на основе решения отраслевых моделей;
- проведение расчетов на моделях ТЭК (на основе результатов, полученных в отраслевых моделях) с учетом возможностей по взаимозаменяемости отдельных ТЭР, диверсификации источников топливо- и энергоснабжения, использования резервов энерготранспортной инфраструктуры и т.д.;
- проведение уточняющих расчетов на моделях отраслевых СЭ с определением рациональных путей обеспечения требуемого спроса на соответствующие ТЭР;
- комплексная оценка возможностей удовлетворения потребителей ТЭР в рассматриваемой ситуации и формирование направлений деятельности по обеспечению надежности топливо- и энергоснабжения потребителей.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОБЪЕКТОВ ПО ВАЖНОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЭ И ТЭК

Надежность топливо- и энергоснабжения потребителей (особенно в условиях реализации возмущающих воздействий преднамеренного характера) непосредственно

связана с необходимостью выявления критически важных объектов (КВО) ТЭК и СЭ. Речь идет о тех объектах, частичный или полный выход из строя которых в разных условиях может существенным образом снизить производственные возможности СЭ и ТЭК в целом и привести к значительным дефицитам соответствующих видов энергии. Анализ взаимосвязанной работы отраслевых СЭ в рамках единого ТЭК позволяет понять – какие КВО уровня СЭ могут быть включены в перечень КВО уровня ТЭК. Критерием такого отбора могут служить относительные величины дефицита ТЭР у потребителей при выходе из строя конкретного КВО с учетом компенсирующих способностей ТЭК по снижению негативных последствий (взаимозаменяемость ТЭР, диверсификация их источников и т.д.). Выявление КВО в ТЭК позволяет эффективно решать задачи анализа и минимизации последствий реализации разного рода угроз для нормального функционирования объектов ТЭК, а также задачи заблаговременной подготовки СЭ к работе в условиях возмущающих воздействий. При этом решается задача концентрации материальных, денежных и людских ресурсов на решении проблем повышения устойчивости функционирования именно выделенных объектов ТЭК без распыления ограниченных, как правило, ресурсов.

Алгоритм формирования перечней КВО регионального и федерального уровней конкретной СЭ представлен на рис. 3.

Порядок формирования перечня КВО в любой СЭ состоит из следующих шагов:

- формирование расчетной схемы конкретной СЭ с основными производственно-технологическими характеристиками объектов и информацией по объемам потребностей в соответствующих ТЭР у потребителей;
- проведение с использованием специализированных математических моделей многовариантных расчетов с определением объемов дефицита соответствующего вида ТЭР при отключении каждого из объектов по одному;
- формирование перечня КВО СЭ федерального уровня с включением в него всех объектов, при нарушении работы которых суммарная относительная недопоставка соответствующего вида ТЭР потребителям составляет величину выше определенного порогового значения (к примеру, в 5% суммарной потребности по СЭ в соответствующем виде ТЭР);
- формирование перечня КВО регионального уровня с включением в него всех объектов, не включенных в перечень КВО федерального уровня, но нарушение работы которых способно создать относительный дефицит в соответствующем виде ТЭР величиной более определенного порогового значения (к примеру, 40% от потребности в данном виде ТЭР) хотя бы в одном из регионов;
- оптимизация расчетной сети при заданном снижении работоспособности каждого объекта из перечней КВО с определением мероприятий минимизирующих дефицит соответствующего вида ТЭР у потребителей в рамках конкретной СЭ (увеличение производственных возможностей объектов, использование резервов и т.п.);
- формирование набора инвариантных мероприятий, с учетом их эффективности для обеспечения работоспособности СЭ, минимизирующих негативные последствия от нарушения работы большего числа объектов из перечней КВО.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ДЕФИЦИТА ТЭР У ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Такой алгоритм базируется на предварительно проводимых модельных исследованиях по оценке возможностей топливо- и энергоснабжения потребителей и наличия “узких” мест, ограничивающих эти возможности. Алгоритм включает следующие шаги:

- а) модельные исследования по анализу состояния энергетического хозяйства страны (региона) и выявление в нем “узких” мест с позиций надежности топливо- и энергоснабжения потребителей;

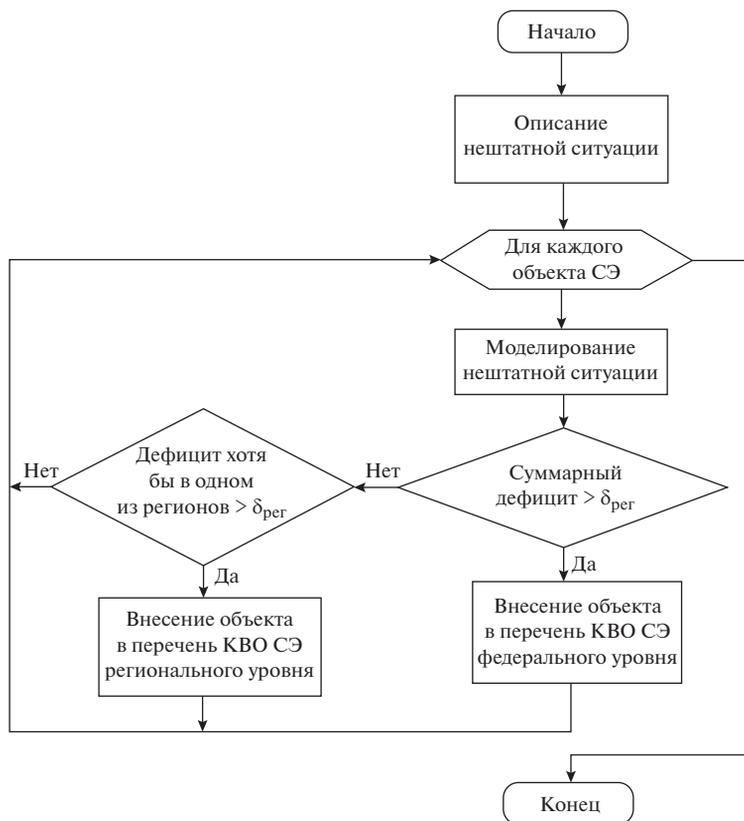


Рис. 3. Алгоритм формирования перечней КВО регионального и федерального уровней конкретной СЭ.

б) формирование располагаемого арсенала мероприятий – технологий, инвестиционных и технических решений, инструментов государственной политики, подходящих для преодоления разного рода угроз;

с) комплексный анализ возможностей топливо- и энергоснабжения потребителей при проведении конкретных мероприятий с учетом их эффективности для минимизации дефицита ТЭР у потребителей и затрат на их реализацию.

Схематично алгоритм формирования оптимальных наборов мероприятий для минимизации объемов дефицита ТЭР у потребителей представлен на рис. 4.

Программная реализация данного алгоритма позволяет сформировать набор инвариантных мероприятий для множества рассматриваемых ситуаций при различных вариантах развития ТЭК. Все математические постановки построены по принципу выбора наименее затратных решений с учетом высоких штрафов (экспертно назначаемых) за недопоставку ТЭР потребителям. Такой комплекс исследований представляет собой основу для выработки конкретных рекомендаций по обеспечению энергетической безопасности страны и регионов. Такие рекомендации должны вырабатываться экспертно на основании модельных исследований и комплексного анализа возможностей обеспечения энергетической безопасности.

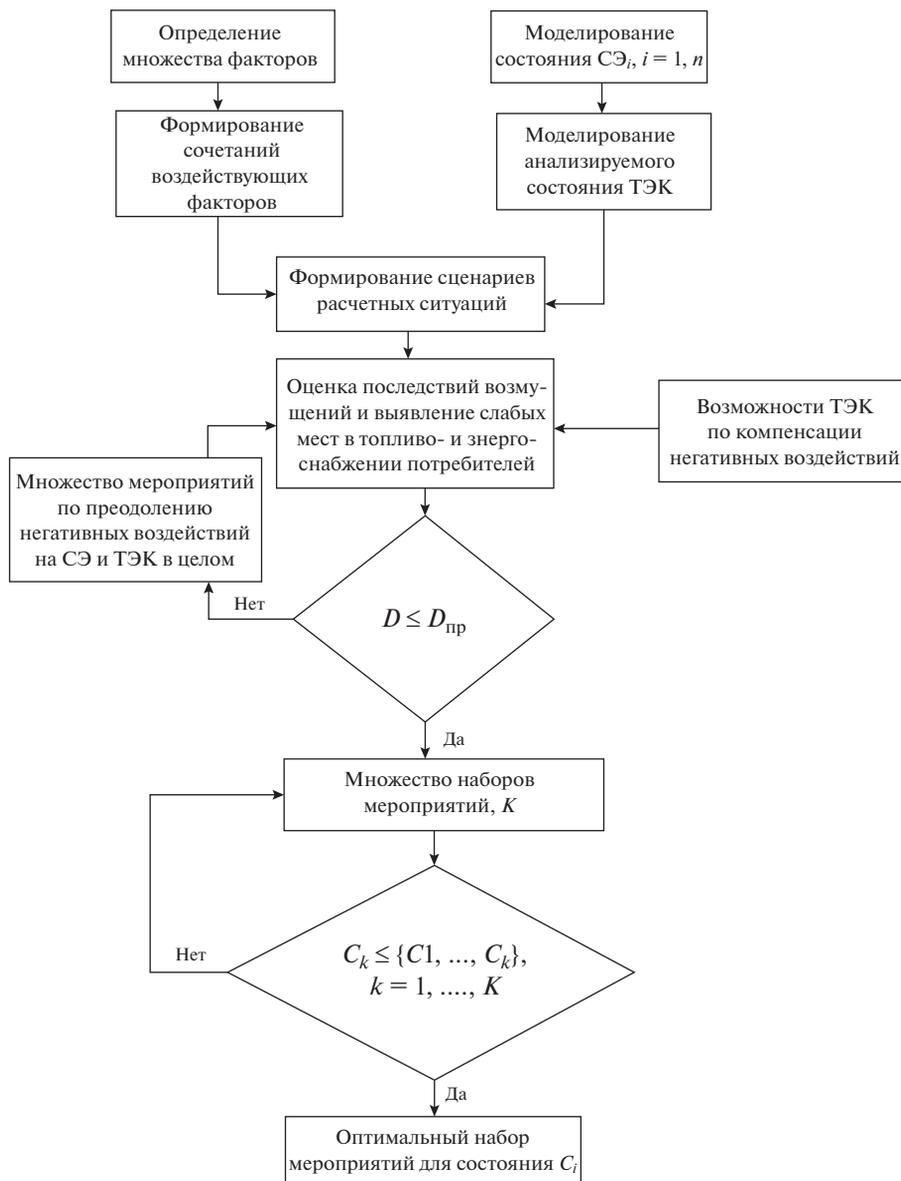


Рис. 4. Алгоритм формирования мероприятий для минимизации дефицита ТЭР (D – суммарный относительный дефицит ТЭР у потребителей; $D_{пр}$ – относительная величина условно приемлемого суммарного дефицита ТЭР у потребителей; C_k – стоимость применения k -го набора мероприятий из множества K).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупная реализация отдельных факторов, формирующих негативные возмущения на работу энергетических объектов и систем энергетики в целом, может вызывать существенные отрицательные последствия такие как:

- сокращение (вплоть до полной потери) производственных возможностей энергетических объектов;

– срывы поставок необходимых ресурсов, обеспечивающих бесперебойную работу СЭ (топливо для ТЭС, котельных; электроснабжение объектов нефтедобычи, нефтеперекачивающих и компрессорных станций; запасные части и оборудование, необходимые хим. реагенты и т.д.);

– нарушение работоспособности промышленно-производственного персонала.

Представленный в статье методический подход к разработке инструментария для анализа надежности топливо- и энергоснабжения потребителей в условиях негативных воздействий на объекты ТЭК и для формирования рациональных наборов мероприятий по обеспечению потребителей конечными видами энергии служит основой для создания комплекса вычислительных средств. Такой комплекс для оценки возможностей топливо- и энергоснабжения потребителей позволит учитывать различные виды возмущающих воздействий на работу систем энергетики. Предложенный авторами алгоритм выявления критически важных объектов энергетики создает возможности по формированию инвариантных превентивных мероприятий, которые позволят минимизировать негативные последствия для потребителей конечных видов энергии.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания № FWEU-2021-0003 (рег. номер: АААА-А21-121012090014-5) Программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В.В., Воропай Н.И., Сендеров С.М., Саенко В.В. О доктрине энергетической безопасности России / Экономика региона. 2012. № 2. С. 40–50.
2. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905140010?index=0&rangeSize=1> (дата обращения: 16.05.2019).
3. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов / Сендеров С.М., Рабчук В.И., Пяткова Н.И., Воробьев С.В. Новосибирск: Наука, 2017. 116 с.
4. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Пяткова Н.И., Рабчук В.И., Сендеров С.М. и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 198 с.

Reliability of Fuel and Energy Supply to Consumers in Conditions of Negative Disturbances in the Energy Sector: a Methodological Approach and Research Algorithms

S. M. Senderov^a, *, V. I. Rabchuk^a, and N. I. Pyatkova^a

^a*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

**e-mail: ssm@isem.irk.ru*

The paper presents the main components of a methodological approach to creating an apparatus for analyzing the reliability of fuel and energy supply to consumers in conditions of negative impacts on the operation of energy facilities. The main factors affecting the scale of the implementation of threats to the reliable functioning of energy systems and the energy sector as a whole are characterized. Algorithms for analyzing the influence of negative impacts on the reliability of fuel and energy supply to consumers, forming lists of critical objects of energy systems, as well as choosing measures to minimize the consequences of negative disturbances on the operation of energy systems and the energy sector as a whole are presented.

Keywords: energy security, strategic threats, negative impacts, reliability of fuel and energy supply